

基于研制数据的产品可靠性验证方案的确定

蒋同斌

(淮阴工学院 计算科学系,江苏 淮安 223001)

摘 要:常用抽样检验的方法进行产品可靠性验证,根据这一方法所确定的验证试验方案,在一定的风险下所需样本量较大,有时在工程上是不可接受的。针对这一问题,提出利用产品研制期间的试验数据,重新确定抽样方案,从而减少验证试验所需样本量或降低风险。

关键词:产品;试验数据;可靠性验证

中图分类号:O21

文献标识码:A

文章编号:1009-7961(2006)03-0010-03

A Study on Reliability of Integrated Test Scheme for Products of Test Data

JIANG Tong-bin

(Department of Computing Science, Huaiyin Institute of Technology, Huaian Jiangsu 223001, China)

Abstract: People usually prove the reliability of products by means of sample test, which needs a lot of samples and is not always applicable in engineering. This article puts forward a way to prove the reliability by using the test data in which the product is experimenting, thus to reduce the amount of samples and the possibility of risks as well.

Key words: product; test data; proof of reliability

0 引 言

为了证明产品在给定的生产方和使用方的风险下达到双方规定的质量水平,往往需要进行产品的可靠性验证,但验证所需试验样本较大或风险较高,有时在工程上不可接受。然而,产品在研制过程中,已进行了大量的科研试验,产品的可靠性已经达到一定水平,如果在确定验证试验方案时考虑这些科研试验的信息,势必会减少验证试验样本数,或在样本数保持不变的情况下,相应降低双方风险。基于以上分析,本文提出了利用产品研制期间的试验数据进行可靠性综合评估,在综合评估的基础上重新确定可靠性验证方案的新思路。

1 产品可靠性评价指标

产品可靠性是产品所具有的寿命质量方面的一种能力。它可以从不同角度、用不同的评价指标来描述,常用的可靠性评价指标有:

a. 可靠度:指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率,称为产品的可靠度,用 $R(t)$ 表示。

若事件 A,其概率为 $P(A)$

则 $R(t) = P(A) \quad 0 \leq P(A) \leq 1$

b. 失效度又称累积故障概率,指产品在规定条件下和规定时间内丧失规定功能的概率,用 $F(t)$ 表示。

由于出现故障与不出现故障是两个对应的事件,故: $R(t) + F(t) = 1$

c. 故障率密度函数:指失效率对时间的分布函数,即 $dF(t)/dt$,称为故障率密度函数,用 $f(t)$ 表示。

由于产品发生失效是随机的,对不同产品、不同工作条,寿命 T 不同,须用故障率密度函数来表示失效率的分布情况。

$$\begin{aligned} f(t) &= dF(t)/dt \\ &= d[1 - R(t)]/dt \\ &= -dR(t)/dt \end{aligned}$$

$$\text{又 } dF(t) = f(t) dt$$

$$\text{则 } F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_0^{\infty} f(x) dx$$

收稿日期:2006-01-23;修改日期:2006-04-10

作者简介:蒋同斌(1961-),男,江苏涟水人,讲师。

d. 故障率函数又称失效率函数,指产品到 t 时刻为止未发生故障,在该时刻后发生故障的概率,用 $\lambda(t)$ 表示。

已知 T 为寿命,用 $T > t$ 表示“产品工作到 t 尚未发生故障”事件;用 $t < T < t + \Delta t$ 表示产品在 $(t, t + \Delta t)$ 内失效事件

则产品工作到 t 时刻后,在 $(t, t + \Delta t)$ 内发生故障的概率为:

$$P(t < T \leq t + \Delta t)$$

再除以 Δt ,则得 Δt 时间内的平均故障率

当 Δt 趋向于 0 时,就可得到 t 时刻的失效率

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(t < T \leq t + \Delta t) / \Delta t$$

e. 平均寿命:指同一批产品的平均工作时间,用 $E(T)$ 表示。

如产品寿命 T 的故障概率密度函数为 $f(t)$,

$$E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

f. 可靠寿命:由可靠度函数 $R(t)$ 知,若给定时间 t 就确定了可靠度,若确定了可靠度,即可求出相应的寿命,即为可靠寿命,用 t_R 表示。

2 产品可靠性一次抽样检验方案

2.1 指数寿命型产品定时试验抽样检验方案

随机抽取一个样本量为 n 的样本进行可靠性寿命试验,试验进行到累计寿命达到预定值 T 时截止,设在试验中共出现 r 次故障,如果 r 小于接收数 C ,认为产品可靠性达到要求,可接收;如果大于接收数 C ,认为产品可靠性没有达到要求,拒收。

对于指数寿命产品,接受

$$L(\theta) \approx \sum_{r=0}^c \left(\frac{T}{\theta} \right)^r \frac{e^{-T/\theta}}{r!} \quad (1)$$

使用方要求产品平均寿命 θ 的极限质量为 θ_1 ,相应的使用方风险为 β ;生产方可接受的质量为 θ_0 ,相应的生产方风险为 α 。则有

$$\begin{cases} L(\theta_1) = \sum_{r=0}^c \left(\frac{T}{\theta_1} \right)^r \frac{e^{-T/\theta_1}}{r!} = \beta \\ L(\theta_0) = \sum_{r=0}^c \left(\frac{T}{\theta_0} \right)^r \frac{e^{-T/\theta_0}}{r!} = 1 - \alpha \end{cases} \quad (2)$$

根据式(5)可以解得试验时间 T 和拒收数 C 。

2.2 成败型产品可靠度一次抽样检验方案

随机抽取一个样本量为 n 的样本进行试验,其中有 f 个失败。规定一个数 C ;如果 $f < C$,则认为该批产品可靠性合格,接收;如果 $f \geq C$,则认为该批产品可靠性不合格,拒收。

设产品的总体可靠性为 R ,则在样本量为 n 的

样本中,出现 f 个失败的概率为

$$P(n, f | R) = (C_n^f) (1 - R)^f R^{n-f} \quad (3)$$

批产品被接收的概率即样本中失效数小于拒收失效数 C 的概率,即失效数为 $0, 1, 2, \dots, C-1$ 的概率总和。显然批产品被接收的概率与产品的总体可靠性 R 有关,记为

$$\begin{aligned} L(R) &= \sum_{f=0}^{c-1} P(n, f | R) \\ &= \sum_{f=0}^{c-1} C_n^f (1 - R)^f R^{n-f} \end{aligned} \quad (4)$$

根据成败型可靠性一次抽样标准 (*IEC605*),确定试验方案前,生产方和使用方协商确定可接收的成功率 R_0 、不可接收的成功率 R_1 、生产方风险 α 及使用方风险 β 。

抽样方案的选择可根据下面的公式得到 n_f 和 r_{RE} 从而确定出试验方案。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 - L(R_0) = 1 - \sum_{f=0}^{c-1} P(n, f | R_0) \\ \beta &= L(R_1) = \sum_{f=0}^{c-1} P(n, f | R_1) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于 n 和 C 必须是整数,所以上式只能近似地被满足。

但是,对于高可靠度产品而言,若双方要求的风险较低,则根据上述方案确定出的试验方案的样本量较大。例如,对于象导弹类价格昂贵的装备,如果经生产方和使用方协商规定可接收的成功率 $R_0 = 0.9$,鉴别比 $D_R = 2$,即不可接收的成功率为 $R_1 = 0.8$,设生产方和使用方的风险均为 20%,则根据成败型可靠性一次抽样标准 (*IEC605*) 可以确定定数试验方案为 (39, 6),即需随机抽取样本量 $n = 39$ 的一组样本,如果试验结果的失效数 $f < 6$,则认为批产品可靠性合格,接收;如果 $f \geq 6$,则认为批产品可靠性不合格,拒收。这种需要较多试验样本的验证试验方案在工程实际中一般是不能被接受的。如果采用 (9, 2) 的经验方案,同样可接收的成功率 $R_0 = 0.9$,鉴别比 $D_R = 0.2$,则生产方风险为 5.3%,使用方风险为 73.8%,是一个令使用方很难接受的可靠性验证试验方案。

3 基于研制数据的可靠性验证方案

产品在研制期间会产生大量的研制试验数据,这些数据可归纳为层次性、阶段性和相似性数据,采用相应的可靠性评估方法,对这些数据进行综合评估,其结果可作为制定可靠性综合验证方案的基础。以成败型产品为例,论述利用科研试验数据进行产品可靠性综合验证的方法。

首先对成败型产品研制过程中的试验数据进行可靠性综合评估,然后将评估结果折合成成败型数据,结果为 (n_0, f_0) ,其中 n_0 为等效试验次数, f_0 为等效失败次数,基于 *Fiducial* 推断,利用 (n_0, f_0) 可以求得可靠度置信分布函数为 $F_0(r)$,置信密度函数为 $f_0(r)$ 。根据成败型产品的可靠度置信下限的求解方法以及可靠度置信分布的定义,可以求得可靠度置信分布函数为

$$F_0(r | n_0 - f_0, f_0 + 1) = \frac{1}{B(n_0 - f_0, f_0 + 1)} \int_0^r x^{n_0 - f_0 - 1} (1 - x)^{f_0} dx \quad (6)$$

密度函数为

$$f_0(r | n_0 - f_0, f_0 + 1) = \frac{1}{B(n_0 - f_0, f_0 + 1)} r^{n_0 - f_0 - 1} (1 - r)^{f_0} \quad (7)$$

将式(7)记为 $f_0(r)$ 。

设研制阶段产品可靠度真值为 R' ,待验证的产品可靠度真值为 R'' ,基于 *Fiducial* 推断,可靠度置信分布函数为 $F_1(r)$,置信密度函数为 $f_1(r)$ 。设最后求得的验证试验方案为 (n, c) ,则置信密度为

$$f_1(r | n - c, c + 1) = \frac{1}{B(n - c, c + 1)} r^{n - c - 1} (1 - r)^c \quad (8)$$

将式(8)记为 $f_1(r)$ 。

由于研制阶段的产品与产品的验证的可靠性水平是有差异的,为了反映这种差异,引入系数 δ ,使得 $R^\delta = R' \cdot \delta$ 的物理意义是反映产品可靠性验证需要达到的可靠性水平与研制阶段产品的可靠性水平的差异。若 $\delta = 1$,则认为二者的可靠性水平一致;若 $\delta < 1$,则认为产品可靠性验证需要达到的可靠性水平高于研制阶段的可靠性水平;若 $\delta > 1$,则认为可靠性验证需要达到的可靠性水平低于研制阶段的可靠性水平。

因为 $0 \leq R' \leq 1$ $0 \leq R'' \leq 1$ 所以从数学的角度来看,一定存在惟一的 δ ,其中 $0 < \delta < \infty$ 。

已知 $R_0 \sim f_0(r)$,则 $R_0^\delta \sim f_0^{(\delta)}(r)$ 。其中

$$f_0^{(\delta)}(r) = \frac{1}{B(n_0 - f_0, f_0 + 1)} (r^{1/\delta})^{n_0 - f_0 - 1} (1 - r^{1/\delta})^{f_0} \left(\frac{1}{\delta} r^{1/\delta - 1}\right) \quad (9)$$

因为 $R_0^\delta = R_1$,所以可以认为两者服从同一分布,用 $f_0^{(\delta)}$ 逼近 $f_1(r)$,从而求得 δ 。可采用 δ 的求的方法如下

$$\min_{\delta} \int_0^1 |f_1(r) - f_0^{(\delta)}(r)| dr$$

设求得的 δ 为 δ ,则 R_0^δ 为历史试验数据中反映

当前产品的信息,然后可求得 $R_0^{(\delta)}(r)$ 。

抽样方案的选择利用可靠度置信密度函数来求解,可根据下面的公式得到验证试验所需样本量 n 和接收数 c ,从而确定出试验方案。

$$L(P_0) = \frac{\int_0^R f_0^{(\delta)}(r) r^n f^{-rRE+1} (1-r)^{rRE-1} dr}{\int_0^1 r^{(n-rRE)} (1-r)^{rRE-1} dr} \geq 1 - \alpha$$

$$L(P_1) = \frac{\int_0^R f_0^{(\delta)}(r) r^n f^{-rRE+1} (1-r)^{rRE-1} dr}{\int_0^1 r^{(n-rRE)} (1-r)^{rRE-1} dr} \leq \beta$$

4 结论

利用产品研制期间的试验数据,采用本文方法重新确定可靠性验证试验方案,可减少试验所需样本量,或在样本量保持不变的情况下降低风险,这尤其适用于价格昂贵的产品的可靠性验证。

参考文献:

- [1]何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2]倪中新. 几种不完全数据的统计分析[D]. 上海:上海师范大学,2001.
- [3]戴树森. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [4]赵宇,黄敏. 变母体变环境数据的可靠性综合评估模型[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(5):86-89.
- [5]孙新利,陆长捷. 工程可靠性教程[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [6]赵宇,黄敏,于丹,等. 利用试验数据的产品可靠性综合验证方案确定方法[J]. 航空学报,2005,9(5):637-640.
- [7]张德然. 可靠性统计与数据挖掘[J]. 西华师范大学学报:自然科学版,2005,9(3):334-337.
- [8]杨海波,张士峰,蔡洪. 可靠性增长试验的优化设计[J]. 系统工程与电子技术,2005,4(4):748-752.
- [9]丘冠英. 可靠性试验数据的统计分析[J]. 华东交通大学学报,2004,2(1):126-128.
- [10]何鹏光,张德然. 可靠性统计:世纪初的回顾与展望[J]. 知识丛林,2005,12:141-142.
- [11]田艳梅,张志华. 成败型产品验收试验方案研究[J]. 海军工程大学学报,2003,10(5):75-78.
- [12]祝耀昌. 可靠性试验及其发展趋势[J]. 航空标准化与质量,2005,05:30-33.
- [13]赵海燕,芮延年. 基于模糊理论机构运动可靠性综合评价方法[J]. 淮阴工学院学报,2006,15(1):19-21.

(责任编辑:吴廷东)